

УДК 535.36:534.2

## ДИФРАКЦИЯ НЕПОЛЯРИЗОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

*Л.И. Михеев, В.И. Балакиев*

### Аннотация

Представлены результаты теоретического исследования возможности создания быстродействующего акустооптического модулятора неполяризованного света, предназначенного для импульсной модуляции излучения волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1.06 мкм. Предложена оригинальная конструкция модулятора на основе кристалла ниобата лития с использованием собственного пьезоэффекта кристалла для возбуждения объемных акустических волн. Найден оптимальный срез кристалла, обеспечивающий эффективность дифракции до 90% при управляющей мощности порядка 1.5 Вт и временем отклика модулятора 0.1 мкс.

**Ключевые слова:** акустооптика, акустооптический модулятор, акустооптическое взаимодействие, ниобат лития, акустооптическое качество, пьезоэффект.

---

### Введение

Явление дифракции света на ультразвуке (акустооптическое взаимодействие) в настоящее время является одним из основных эффектов, которые используются для управления оптическим излучением. Такие приборы акустооптики, как модуляторы, дефлекторы и фильтры, широко применяются не только в лазерной физике и оптоэлектронике, но и в экологии, медицине, военном деле. Это обусловлено их широкими функциональными возможностями, высоким быстродействием, малыми управляющими напряжениями, надежностью и простотой конструкции [1].

К сожалению, все эти приборы нормально функционируют лишь, когда падающее оптическое излучение имеет поляризацию одной из собственных мод используемого в устройстве кристалла (то есть линейную или эллиптическую). Это обусловлено акустооптической анизотропией среды: коэффициент акустооптического качества  $M$ , определяющий эффективность дифракции, имеет разные значения для разных оптических мод. Таким образом, чтобы акустооптический прибор нормально работал, необходимо на его входе ставить поляризатор. Но это приводит к потере половины световой мощности в случае неполяризованного оптического излучения, что во многих случаях является совершенно недопустимым.

Проблема управления неполяризованным светом чрезвычайно актуальна; она стоит в акустооптике с 60-х годов прошлого столетия. Наиболее простое решение заключается в использовании кристалла молибдата свинца ( $\text{PbMoO}_4$ ), у которого найден уникальный срез, дающий практически одинаковые значения качества  $M$  для обеих оптических мод. Однако этот срез характеризуется относительно небольшим значением  $M$ , и акустооптический эффект достигается при так называемой изотропной дифракции света, которая не позволяет создавать устройства с хорошими параметрами. Другое решение состоит в применении двух скрещенных акустооптических ячеек, расположенных последовательно, или же в расщеплении падающего светового пучка на два пучка с ортогональными поляризациями

с последующим их сведением на выходе ячейки в один пучок. Указанные методы имеют ряд недостатков: сложная конструкция, трудная юстировка системы, низкая надежность, увеличение управляющей мощности и др.

Еще одной серьезной проблемой, относящейся ко всем акустооптическим устройствам, остается их высокая стоимость – несколько тысяч долларов только за модулирующую ячейку. Высокая стоимость обусловлена сложностью технологического процесса и необходимостью применения ручного труда высококвалифицированных оптиков при изготовлении акустооптических ячеек. Высокая стоимость акустооптических приборов является серьезным препятствием для их более широкого применения в промышленности, медицине, бытовой технике и др.

Настоящее исследование своей главной целью имеет разработку акустооптических устройств с возбуждением объемных акустических волн по новой технологии на основе собственного пьезоэлектрического эффекта акустооптического кристалла. Это позволит обойтись без пластинчатого пьезопреобразователя, используемого в настоящее время, изготовление которого в основном и определяет высокую стоимость акустооптических ячеек. Наиболее подходящим для этих целей кристаллом является ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), имеющий хорошие акустооптические свойства и отличающийся чрезвычайно сильным пьезоэффектом [2].

Конкретная задача, решаемая нами, состоит в разработке и экспериментальной реализации акустооптического модулятора светового излучения с длиной волны 1.06 мкм для волоконного иттербиевого лазера, предназначенного для работы в системах волоконно-оптической связи. Поскольку такой лазер дает неполяризованное излучение, на первом этапе работы основные усилия были направлены на поиск такого среза кристалла ниобата лития, который, во-первых, дает близкие значения акустооптического качества  $M$  для обеих поляризаций оптических мод, а во-вторых, обеспечивает высокую эффективность дифракции (не менее 90%) при умеренном уровне потребляемой мощности.

## 1. Постановка задачи

Детальный расчет акустооптического эффекта в кристаллах является сложной задачей. Основной характеристикой материала, определяющей его пригодность для создания акустооптических устройств, является акустооптическое качество  $M$ . Чем больше качество  $M$ , тем меньшая акустическая мощность требуется для получения заданной величины эффективности дифракции [1]. В кристаллических средах акустооптическое качество определяется выражением

$$M = \frac{1}{4n_0n_1\rho V^3} \left\{ e_i^{(1)} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} e_l^{(0)} p_{jkmn} (r_m m_n + r_n m_m) \right\}^2, \quad (1)$$

где  $n_0$  и  $n_1$  – показатели преломления для падающего и дифрагированного света соответственно,  $e_l^{(0)}$  и  $e_i^{(1)}$  – компоненты векторов поляризации собственных мод падающего и дифрагированного света,  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости,  $p_{jkmn}$  – компоненты тензора фотоупругости,  $r_m$  и  $m_n$  – компоненты единичных векторов поляризации и волновой нормали акустической волны соответственно,  $\rho$  – плотность среды,  $V$  – скорость звука. Из формулы (1) ясно, что расчет акустооптического эффекта должен включать в себя на первом этапе полный расчет оптических и акустических характеристик кристалла: определение скоростей оптических и акустических мод, их поляризаций, векторов Умова – Пойнтинга, углов сноса оптической и акустической энергии, тензора деформации для выбранной акустической моды. Кроме того, в расчет необходимо включить

условие акустооптического фазового синхронизма, дающее связь между частотой ультразвука и углами падения и дифракции света.

Выбор кристалла ниобата лития в качестве материала для изготовления модуляторной ячейки был определен не только его хорошими акустооптическими свойствами, но и, главное, чрезвычайно большой величиной пьезоэффекта. Этот кристалл широко используется в акустике для изготовления высокочастотных пьезопреобразователей и акустических фильтров [3]. Основная проблема состояла в отыскании среза кристалла с близкими и максимально возможными по величине значениями акустооптического качества для обеих оптических мод (обыкновенной и необыкновенной). Именно такой срез необходим для модуляции неполяризованного света. Кроме того, этот срез должен характеризоваться достаточно большими значениями пьезомодулей для эффективного возбуждения ультразвука.

Для детального расчета была составлена программа, включающая четыре части: расчет оптических свойств кристалла ниобата лития (расчет показателей преломления и поляризаций собственных мод), расчет акустических свойств (нахождение скоростей всех трех акустических мод, их поляризаций и углов сноса акустической энергии), расчет пьезоэффекта и расчет акустооптического качества. Расчет выполнялся в сферических координатах, связанных с кристаллографическими осями  $XYZ$  кристалла, с шагом в  $5^\circ$  по полярному ( $\theta$ ) и азимутальному ( $\varphi$ ) углам для каждой из трех собственных акустических мод и для разных направлений света.

## 2. Результаты расчета

Наилучшим для решения поставленной задачи оказался срез кристалла с квазисдвиговой медленной акустической модой, распространяющейся в плоскости  $YZ$  ( $\varphi_a = 90^\circ$ ) под углом  $\theta_a = 13^\circ$  к оси  $Z$ . У этой моды фазовая скорость равна  $V = 3.55 \cdot 10^5$  см/с, вектор поляризации лежит в плоскости  $YZ$ , образуя угол  $86.3^\circ$  с направлением волновой нормали. Угол сноса энергии небольшой – всего лишь  $2.7^\circ$  в плоскости  $YZ$ . Для этой акустической моды на рис. 1 показано пространственное распределение акустооптического качества в координатах углов падения света  $\varphi_o$  (по оси абсцисс) и  $\theta_o$  (по оси ординат). Хорошо видна анизотропия акустооптического эффекта.

Для удобства выбора направлений распространения света с близкими значениями качества для  $e$ -волны ( $M_e$ ) и  $o$ -волны ( $M_o$ ) в той же системе координат было построено пространственное распределение отношения  $M_e/M_o$ , показанное на рис. 2 слева.

На графике пространственного распределения отношения  $M_e/M_o$  отображены области, соответствующие интервалу значений  $0.7 < M_e/M_o < 2.1$ . Отношение  $M_e/M_o = 2.1$  соответствует границам изображенной области. Например, одинаковые для обеих мод значения качества  $M_e = M_o = 3.0 \cdot 10^{-18}$  с<sup>3</sup>/г получаются при распространении света в направлении  $\varphi_o = 90^\circ$ ,  $\theta_o = 65^\circ$ . Но, как видно из рис. 1, это далеко не самое большое значение качества. Кроме того, надо учитывать, что разным точкам на рис. 1 соответствуют разные частоты ультразвука (то есть при заданном направлении звука для различных направлений распространения света, которые задаются точкой на рис. 1, акустооптический эффект будет наблюдаться при определенной частоте звука, неодинаковой для всех возможных направлений распространения света на рис. 1). Для указанного выше направления распространения света  $\varphi_o = 90^\circ$ ,  $\theta_o = 65^\circ$  частота звука равна 9 ГГц. Создание акустооптического модулятора на такой частоте в настоящее время не представляется возможным. На рис. 2 справа показана область реальных с экспериментальной точки зрения частот: границы области соответствуют частоте 500 МГц. Таким

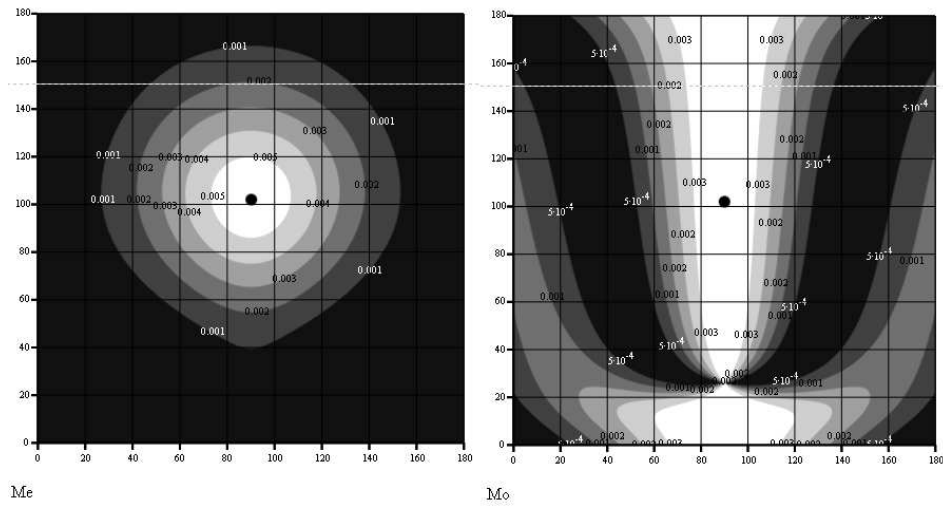


Рис. 1. Пространственное распределение акустооптического качества для  $e$ -волны (слева) и  $o$ -волны (справа). Направление света для оптимального среза указано точкой

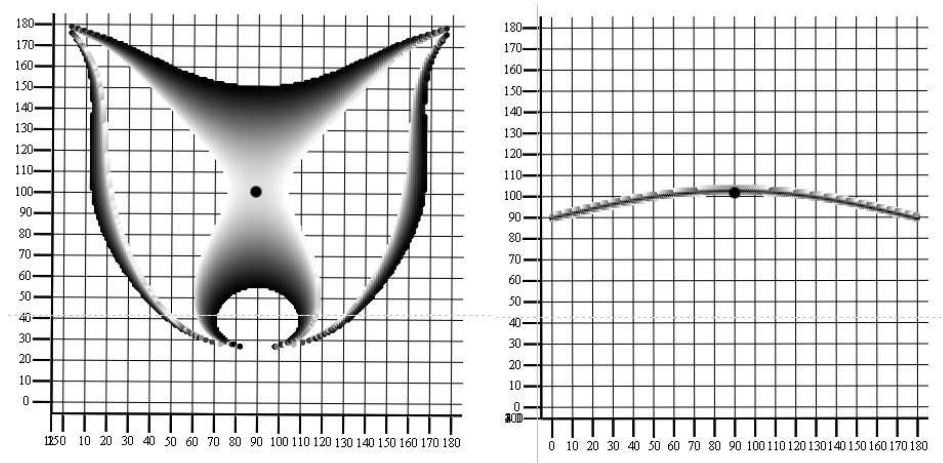


Рис. 2. Пространственное распределение отношения  $M_e/M_o$  (слева) и пространственное распределение частот ультразвука (справа). Направление света для оптимального среза указано точкой (то есть координаты точки задают углы оптимального падения света  $\varphi_o$  и  $\theta_o$  в сферической системе координат)

образом, только совместный анализ рис. 1, 2 позволяет сделать оптимальный выбор среза кристалла и геометрии акустооптического взаимодействия. В результате такого анализа получено направление  $\varphi_o = 90^\circ$ ,  $\theta_o = 103^\circ$ . Для этого варианта  $M_e = 5.73 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$ ,  $M_o = 2.99 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$ , а коэффициенты качества отличаются в 1.92 раза. Тем не менее, как показали расчеты, представленные в таблице на рис. 3, именно этот срез (в таблице он обозначен номером 14) обеспечивает получение 90%-ной эффективности дифракции неполяризованного света при наименьшем уровне акустической мощности  $P_a = 1.17 \text{ Вт}$ .

Так как с научной точки зрения представляет интерес также поиск максимального значения акустооптического качества кристалла ниобата лития, соответствующие срезы также были проанализированы и сведены в общую таблицу

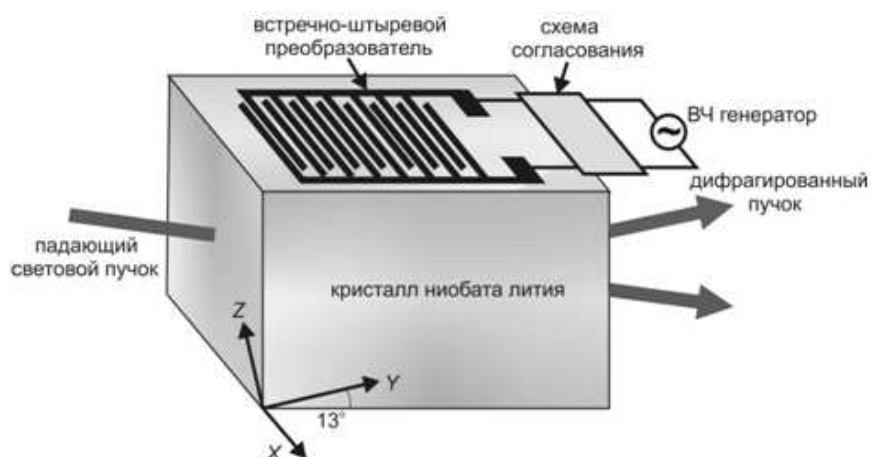


Рис. 3. Проект акустооптического модулятора из ниобата лития оптимального среза

Табл. 1

Срезы кристалла ниобата лития

№	$\phi_a$	$\theta_a$	$\phi_o$	$\theta_o$	$M_e, \times 10^{-18} \text{ c}^3/\text{г}$	$M_o, \times 10^{-18} \text{ c}^3/\text{г}$	$f_e, \text{ МГц}$	$f_o, \text{ МГц}$
1	5°	100°	140°	167°	3.51	3.08	218	218
2	15°	45°	122°	10°	21	0.02	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>
3	15°	120°	150°	142°	7.27	3.22	287	291
4	15°	140°	60°	60°	5.29	3.79	175	180
5	15°	170°	30°	80°	3.05	3.01	84	87
6	25°	90°	115°	37°	18	2.90	0.04	0.04
7	25°	110°	100°	50°	11	4.02	537	549
8	35°	50°	118°	5°	22	0.01	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>
9	65°	80°	20°	168°	3.47	3.03	435	436
10	70°	140°	10°	10°	19	0.02	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>
11	80°	20°	90°	110°	11	2.2	71	74
12	85°	80°	85°	170°	9.34	1.67	0.14	0.14
13	85°	140°	10°	10°	22	0.3	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>
14	90°	13°	90°	103°	5.73	2.99	130	135

(см. табл. 1), несмотря на их непригодность для создания акустооптического модулятора неполяризованного света (например, это срезы кристалла под номерами 2, 8 и 13).

В разрабатываемом модуляторе возбуждение ультразвука будет осуществляться за счет собственного пьезоэффекта кристалла ниобата лития. Для этого на грань кристалла, перпендикулярную направлению распространения ультразвукового пучка, методом фотолитографии будут нанесены встречно-штыревые электроды (рис. 4). Подаваемое на них напряжение с ВЧ-генератора будет возбуждать необходимую акустическую моду. Для получения высокой эффективности преобразования электрической мощности в акустическую необходимо обеспечить согласование выхода генератора с импедансом пьезопреобразователя, что обычно осуществляется реактивными элементами L и C. Расчет пьезоэффекта в выбранном срезе ниобата лития показал, что эффективный пьезомодуль имеет большое значение, превосходящее наибольшую величину пьезомодуля кварца в 27 раз. Особенностью возбуждаемого с помощью встречно-штыревого преобразователя акустического пучка является его неоднородная структура, поскольку соседние «пальцы»

преобразователя возбуждают звук в противофазе. Это дает эффект сканирования диаграммы направленности акустического пучка при изменении частоты ультразвука, что при правильном выборе параметров преобразователя позволяет расширить полосу акустооптического взаимодействия. Благодаря этому увеличивается быстродействие устройства.

### Заключение

Детальный расчет акустических и акустооптических характеристик кристалла ниобата лития позволил найти срез, перспективный для изготовления модулятора оптического излучения на длину волны 1.06 мкм с заданными характеристиками: временем отклика модулятора 0.1 мкс, потребляемой мощностью менее 2 Вт, частотным диапазоном 200–250 МГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-07-00623, 10-07-00683).

### Summary

*L.I. Mikheev, V.I. Balakshy.* The Diffraction of Nonpolarized Optical Radiation by Volume Acoustic Waves in Lithium Niobate Crystal.

The goal of the research was the development of a fast-acting acousto-optic modulator of nonpolarized light, aimed at pulse modulation of ytterbium fiber laser radiation with a wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$ . An original modulator design was proposed based on lithium niobate crystal using the crystal's inherent piezoelectric effect for excitation of volume acoustic waves. An optimal crystal cut was found which provides 90% diffraction efficiency at a driving power of around 1.5 W and a modulator response time of 0.1  $\mu\text{s}$ .

**Keywords:** acousto-optics, acousto-optic light modulator, acousto-optic interaction, lithium niobate, acousto-optic figure of merit, piezoelectric effect.

### Литература

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985. – 266 с.
2. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. и др. Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.
3. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. – М.: Наука, 1982. – 424 с.

Поступила в редакцию  
23.03.11

---

**Михеев Лев Игоревич** – студент физического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.

E-mail: *mikheev\_lev@mail.ru*

**Балакший Владимир Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия.

E-mail: *balakshy@phys.msu.ru*